

## 축류 압축기 기술 개발 동향

송재욱\* · 이성룡\* · 이상언\*

### 1. 서 론

군수 및 민간 항공기분야에서 지배적으로 사용되는 가스터빈은 낮은 발열량을 갖는 연료부터 높은 연료를 갖는 다양한 연료에 대해서 작동이 가능하기 때문에 최근 열 병합 발전용뿐만 아니라 기름이나 가스의 수송용으로 그 활용 범위가 확대되고 있다.

가스터빈은 압축기, 연소기, 터빈의 주요 구성품으로 구성되어 있다. 그리고 터빈에서 생산되는 전체 출력(Power)중에서 상당 부분이 압축기에서 소비되므로 압축기의 작은 효율 변화에 대해서도 가스터빈 전체 성능이 민감하게 반응을 한다.

Fig. 1에서 보이듯이 단순 Brayton 사이클의 열효율을 높이기 위해서는 일반적으로 압력비 구성품의 효율 및 터빈입구 온도를 증가시켜야 한다.

약 60:1의 압축비, 94% 폴리트로픽 압축효율을 갖는 가스터빈의 경우 열효율이 약 55%에 도달할 수 있음을 보여준다. 또한 주어진 압축비를 만족하기 위하여 각 단에 대해 큰 부하 조건을 갖는 설계를 함으로써 압축기의 단수를 감소시켜 제작비 절감의 효과를 가져오기도 한다. 최신 설계기술을 이용하여 압축기의 효율을 향상 시킬 경우 약 35°C의 터빈입구 온도를 낮추는 효과를 볼 수 있다.

본 자료는 선진업체에서 수행하고 있는 압축기 설계방법을 조사하고 압축기 성능향상을 위해 적용하고 있는 기술을 소개하고 있다.<sup>(1)~(3)</sup> 또한 두산중공업의 가스터빈개발에 맞춰 수행하고 있는 압축기의 설계결과를 간단하게 요약 정리하였다.

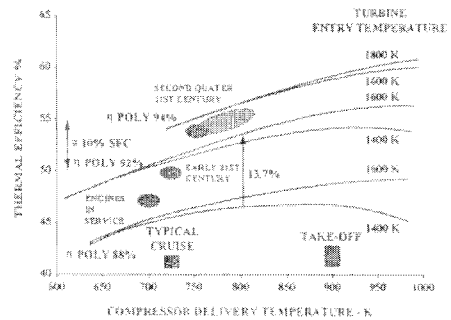


Fig. 1 압축비, 터빈입구 온도, 구성품 효율의 효과(Singh, 1996)

### 2. 선진업체의 압축기 개발방법

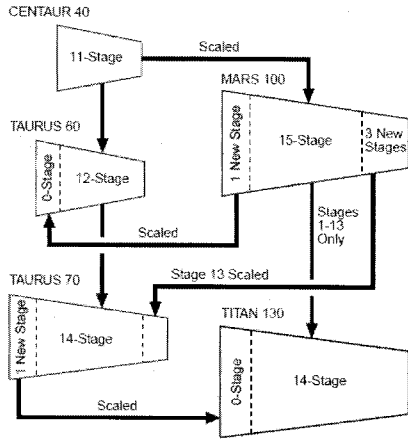
#### 2.1 압축기 성능향상

압축기를 개발하는 방법으로는 개념설계부터 시작하여 1차원 설계, 3차원 설계를 진행하여 압축기를 개발하는 방법과 기존에 개발된 압축기에 대해 상사성을 활용하여 개조 개발하는 것으로 크게 나눌 수 있다. 각각의 경우 고유의 장단점이 있으나 처음부터 설계된 압축기에 비해 개조 개발하는 방법은 기존 압축기의 설계인자들에 대해 높은 정확성과 신뢰성을 갖기 때문에 개발기간 단축과 높은 효율성, 개발 리스크 감소 및 비용 절감 등의 이점이 있다. 실제로 Wadia<sup>(4)</sup>는 압축기의 성능을 향상시키기 위하여 Inter-Cooling, Inlet Super charging, 및 Recuperation등과 같은 새로운 기술을 적용한 것이 아니라 기존의 압축기 입구에 한 단을 더 설치하여 유량을 증가시키는 가장 단순하고 안전한 방법을 적용하였다.

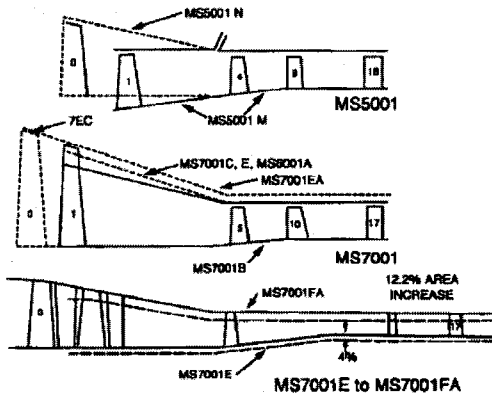
Fig. 2는 소형가스터빈의 선두업체인 Solar Turbine과 항공용 및 발전용 가스터빈 시장을 리드하고 있는 General Electric(GE), 그리고 러시아의 대표적인 업체의 압축기 개발 지도를 보여주고 있다.

\* (주) 두산중공업

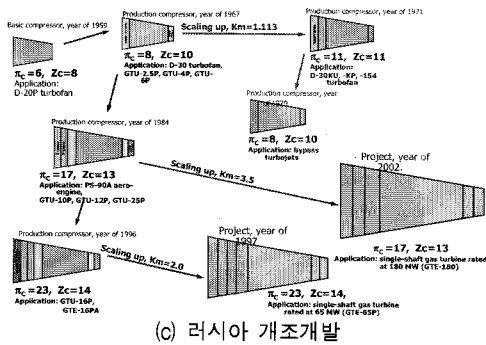
E-mail : jaewook.song@doosan.com



(a) Solar Turbine 개조개발(Solar Turbine, 1998)



(b) GE 개조개발 (Brandt, 1994)



(c) 러시아 개조개발

Fig. 2 압축기 개발 지도

## 2.2 압축기 기술의 전환

상사성에 기초한 개발은 기본적으로 용량증가는 가져오지만 효율이나 압축비를 향상시킬 수 없다. 따라서 선진업체는 기존의 압축기보다 더 좋은 성능을 얻기 위하여 진화적인(Evolutionary) 접근방법과 혁신적인(Revolutionary) 접근 방법을 적절히 조

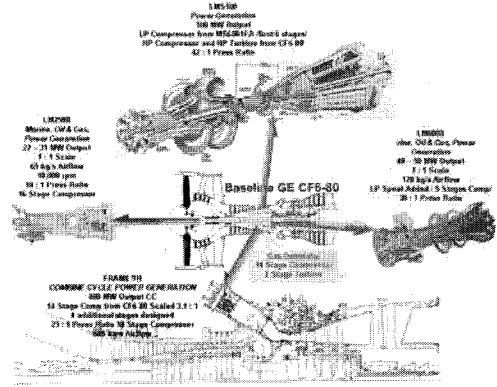


Fig. 3 GE 산업용 가스터빈 개발

합하여 수행한다. 진화적인 방법은 높은 효율을 얻기 위하여 전통적인 설계개념을 수정하기 위해 보다 진보된 해석기술을 사용하는 반면에 혁신적인 방법은 Counter-Rotating 압축기와 같이 완전히 새로운 개념을 적용하여 높은 압축비, 효율 및 넓은 작동범위를 갖는 압축기를 개발하는 것이다. 이와 같은 새로운 기술은 주로 설계 요구조건이 보다 까다로운 항공용 가스터빈 압축기 개발에 적용되어 왔으며 이에 대한 기술이 성숙한 후 산업용 압축기에 사용되고 있다.

Fig. 3과 같이 최근 산업용 가스터빈의 수요가 증가함에 따라 항공용 압축기인 CF6-80이 대형 산업용 가스터빈인 H Frame과 LMS100의 압축기에 적용되기도 한다.

마찬가지로 러시아에서도 대규모의 투자를 통하여 군용항공기에 사용할 목적으로 다양한 가스터빈 엔진을 개발하였고 구 소련의 붕괴와 더불어 기존의 항공용 엔진을 이용하여 산업용 가스터빈의 파생형 모델을 개발함으로써 민수산업으로의 전환을 시도하고 있다.

## 3. 축류압축기 개발 방향

### 3.1 압축기 설계 요구조건

현재까지 진행된 축류압축기의 개발 경향은 지속적으로 단당 압축비를 증가시켜 압축기의 단수를 줄임으로 압축기의 제작비용 또는 유지보수 비용을 절감하는 방향으로 진행되어 왔으며 이를 구현하는 것이 최신 압축기 기술의 최대과제 중에 하나였다. 식 (1)은 압축비를 계산하는 식을 나타낸 것이다.

$$PR_{stage} = \left( \frac{1}{C_p} \frac{\psi \eta_{stage}}{1} \left( \frac{U_{tip}}{\sqrt{T_1}} \right)^2 + 1 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

여기서, 각 변수의 주요부는 다음과 같다.

PR: 압축비

$\psi$  : 부하계수

$U_{tip}$  : 회전속도, m/2

$T_1$  : 입구온도, K

$C_p$  : Specific Heat Coefficient

식 (1)에 나타난 것과 같이 단당 압축비를 증가시키기 위한 방법으로는 다음의 두 가지 방법이 있다. 첫째, 압축기의 부하계수를 증가시키는 방법이 있다. 부하계수를 증가시킬 경우 식에서와 같이 효율이 감소하게 된다. 둘째, 회전속도를 증가시키는 방법이 있다. 회전속도를 증가할 경우 공력적으로는 마하수가 증가하게 되고 구조적으로는 회전속도 증가에 따라 원심응력이 증가하게 된다. 따라서 회전속도를 증가시키는 경우에는 압축기에 적용되는 소재를 보다 가벼운 소재로 선정하고 제작방법에 있어서도 무게를 줄이는 방향으로 설계가 진행된다(Fig. 4).

구조적인 부하와 공력적인 부하의 증가를 만족하기 위해 압축기 내부에서 충분히 유동을 감소시킬 수 있는 낮은 종횡비 (Aspect Ratio)를 갖는 블레이드를 적용하기 시작하였다. 이와 같은 변화는 새로운 공력설계 Tool을 사용하여 모든 가능한 설계를 검증할 수 있기 때문이다. 특히 큰 부하계수를 갖는 압축기의 공력적인 안정성과 효율을 향상하기 위하여 3차원 유동특성을 고려한 3차원 블레이드 형상인 Lean, Sweep 그리고 Endbend 설계기술이 적용되고 있다.

이와 함께 서진마진을 증가하기 위하여 Casing Treatment에 대한 시험과 유동해석이 지속적으로 수행되고 있으며 능동적인 서지감시 및 조절 기술에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

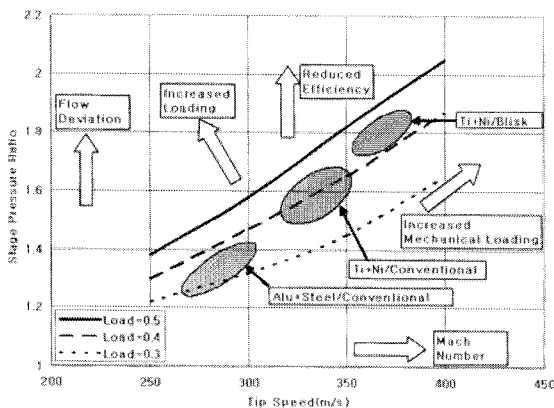


Fig. 4 단당 압축비의 상승

### 3.2 압축기 블레이드 설계

단당 축류압축기를 설계하는 경우 각 단의 위치에 따라 다르게 나타나는 유동특성을 고려하여 각 단 별 설계기술도 달리 적용한다. 압축기 입구단은 상대적으로 높은 마하수를 가지므로 천음속(Transonic) 또는 초음속(Supersonic) 압축기로 설계가 되며, 중간단 및 출구단의 경우에는 아음속(Subsonic) 압축기로 설계가 이뤄지고 있다.

블레이드 형상설계와 반경방향으로 블레이드를 쌓은 방법에 대해서는 다음의 3가지로 연구가 진행되어 왔다.

#### 3.2.1 익형(Airfoil) 설계

아음속 압축기인 경우에는 많은 업체들이 NACA, 또는 DCA와 같은 Profile Family를 적용하여 압축기를 설계하였다. 그러나, 최근에는 컴퓨터의 용량 증가에 따라 기존에 확보된 데이터베이스를 근거로 형상 설계 프로그램에 직접 설계가 아닌 역설계 방식을 취한 최적설계 Tool을 활용하여 효율을 향상시키거나 작동범위를 증가시키는 새로운 형상의 압축기가 설계되고 있다.

#### 3.2.2 스위프 블레이드(Sweep Blade)

충격파 손실, 더 나아가 이차유동 손실을 조절하기 위하여 앞전(Leading Edge)의 스위프에 관한 연구를 수행하여 왔다. 날개의 앞전에 수직인 마하수가 충격파의 강도에 영향을 주기 때문에 마하수가 큰 입구단의 블레이드와 베인에서 주로 연구가 되었다.

베인의 경우에는 허브지점에서 마하수가 1보다 큰 경우가 빈번히 발생하여 전진형 스위프(Forward Sweep) 베인을 적용하는 경우도 있다.

#### 3.2.3 Endbend Vane

GE에서는 E3가스터빈 압축기에서 3차원 블레이드 설계 방법중 하나인 Endbend 베인을 적용하여 효율 및 안정성을 향상시켰다. 벽면근처 베인출구의 Swirl각을 증가시켜 베인에 비해 블레이드의 확산 계수를 증가시키는 효과를 가져왔다. 그리고 벽면에서의 베인설치각(Stagger)이 평균 반경 근처의 설치각에 비해서 약 6~12° 정도 크게 되도록 설계하였다. 이것이 일반적인 베인출구의 Swirl에 비해서 성능적으로 우수한 것이 판명되었다.

Table 1 압축기 설계요구 조건

구 분	단위	값
입구 전온도	K	288.0
입구 전압력	KPa	100.8
공기유량	kg/s	21.44
압축비		14.0
효율	%	83.0 이상
서지 여유	%	15.0 이상
회전수	rpm	12,825

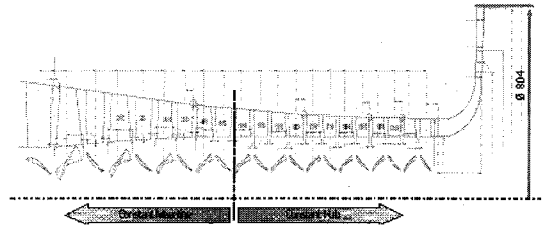


Fig. 5 압축기 자오면 유로

## 4. 두산중공업의 가스터빈개발

### 4.1 압축기 성능요구 조건

현재 두산중공업에서 개발중인 가스터빈은 발전용 가스터빈으로 부하변동이 거의 없이 일정한 회전수에서 작동하므로 구조적으로 간단한 단축 가스터빈으로 설계되었다. 설계점 성능 해석은 선택된 여러 가지 열역학적 설계변수들을 이용하여 설계점의 운전특성을 모사하는 과정으로 정상 작동시 가스터빈의 출력, 연료소모량, 그리고 열효율 등을 분석한다. 이러한 분석 결과들은 설계 목표값들과 비교를 통하여 새로운 열역학적 설계변수들을 선택하는 반복 작업을 통해 최적의 설계변수들을 찾게 된다. 가스터빈의 목표 열효율을 만족하기 위한 압축기의 설계 요구조건은 Table 1과 같다.

### 4.2 압축기 공력설계

엔진성능에서 요구되는 공력성능을 만족하면서 축방향 길이를 가능한 작게 함으로써 회전 진동특성을 향상시키기 위하여 전체 압축기의 구성을 축류압축기 10단과 원심압축기 1단으로 설계되었다. Fig. 5는 설계된 압축기의 자오면 유로를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 유로 형상은 제작비용을 최소화하기 위해 산업용 가스터빈에서 주로 사용되고 있는 일정한 허브직경을 갖도록 설계되었고 원심압축기는 팁간극에 의해서 발생하는 손실을 줄이기 위하여 쉬라우드 임펠러로 설계되었다.

다음은 압축기 공력설계시 요구된 제한조건을 나타낸 것이다.

- 회전체 진동을 줄이기 위해 단수, 코오드(Chord) 길이 등의 조절을 통한 축방향 길이 최소화
- 앞쪽 베어링의 위치와 크기에 의해 압축기 입구단 허브직경의 크기 제한
- 공력적으로 팁간극에 따른 손실을 최소화하기 위한 축류 압축기 출구단의 높이 제한

### 4.3 압축기 구조설계

축류압축기 로터는 각 단의 디스크를 전자빔으로 용접하여 하나의 드럼을 이루는 디스크-드럼(Disc & Drum) 구조이며 원심 임펠러 디스크와 핀(Pin)을 연결하여 토오크가 전달되도록 설계되었다. 축류 압축기 디스크는 크게 2개의 Spool 구조로 구성되었다. Front Spool로 명명된 앞쪽 1단에서 4단까지는 Axial Dovetail 형태의 블레이드 Attachment로 설계되었으며, Rear Spool로 명명된 뒤쪽 5단에서 10단까지는 Circumferential Dovetail 형상의 Attachment로 설계되었다.

Front Spool은 4개의 디스크로 구성되어 있으며 Dovetail 및 블레이드 Slot에 대해 먼저 기계가공을 통하여 형상을 구현한 후 전자빔 용접을 함으로 일체형 구조가 되도록 하였다. Rear Spool은 6개의 디스크로 구성되어 있으며 Front Spool 제작방법과는 다르게 먼저 전자빔 용접을 하여 일체형 구조로 만든 뒤 Dovetail 및 블레이드 Slot에 대한 기계가공으로 최종 형상을 구현하도록 하였다.

각 단의 양단에는 Purge Hole을 각각 2개씩 마련하여 엔진 운용 중 Spool 내부로 유입되는 오일 및 미세 이물질이 원심력에 의해 배출되도록 하였다. 또한, 3단 디스크 후방에 Labyrinth Seal 및 Graphic Seal의 Balancing Pressure를 구현하기 위한 추가 구멍들이 마련되어 있다.

그리고 로터 전면 베어링은 틸팅패드(Tilting Pad) 저널베어링과 트러스트 저널 베어링으로 구성되어 있다.

## 5. 요약

현재 선진업체들은 성능과 구조적으로 경쟁력 있는 산업용 가스터빈 압축기를 설계하기 위하여 항공기용 압축기 설계기술을 전용하고 있다. 따라서 두산중공업은 DGT-5 압축기 익형설계를 위해 항공용 익형설계에 적용되는 S-Profile 설계기술을 활용하여 설계하였으며 현재 DGT-5 압축기에 대한 1차 성능시험이 완료되어 만족할 만한 결과를 얻었다. 그리고 DGT-5 압축기는 추후 두산중공업 파생형 가스터빈 압축기의

기본압축기로 활용할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 전력산업 연구개발사업 “5MW급 고효율 발전용 소형가스터빈엔진 개발”과제의 지원 하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) R. Singh, 1996, “Fifty Years of Civil Aero Gas Turbines,” Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 68,

No. 4, pp. 3~19.

- (2) Solar Turbine, 1998, “Evolution of the Titan 130 Industrial Gas Turbine,” Turbomachinery Technology Seminar 122.
- (3) D.E. Brandt, R. R. Wesorick, 1994, “GE Gas Turbine Design Philosophy,” GER-3434D, GE Power Generation.
- (4) A.R. Wadia, 2002, “Aerodynamic Design and Testing of an Axial Flow Compressor With Pressure Ratio of 23.3:1 for the LM2500+Gas Turbine,” Journal of Turbomachinery, Vol. 124, pp 331~340.
- (5) Ulf Koller, 2000, “Development of Advanced Compressor Airfoils for Heavy-Duty Gas Turbines-Part 1: Design and Optimization,” Journal of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 397~405.